МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 DOI 10.12737/22162

Технико-экономические и термодинамические аспекты оптимизации лезвийной обработки*

А. А. Рыжкин[1], Ю. А. Олейникова[2], Д. В. Моисеев[3], Е. В. Фоминов[4]**
[1, 2, 3, 4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Technoeconomic and thermodynamic aspects of the edge cutting machining optimization***

A. A. Ryzhkin[1], Y. A. Oleynikova[2], D. V. Moiseev[3], E. V. Fominov[4]**
[1, 2, 3, 4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данного исследования является разработка расчетного метода выбора оптимальной скорости резания, соответствующей минимальной интенсивности изнашивания инструмента. Выполнен анализ известных критериев оптимизации: трибологических, температурных, энергетических и термодинамических. Выявлены признаки их оптимальности при вариации скорости резания (трения). Особое внимание уделено разработанным в Донском государственном техническом университете экспериментальным термодинамическим критериям оптимизации, отражающим флуктуационную природу трения и износа. Показано, что максимальные значения флуктуационных критериев при вариации скорости резания характеризуют повышенные диссипативные возможности зоны резания. Получена формула для расчета оптимальной скорости резания из условий теплового равновесия на контактных площадках токарного резца. Кроме элементов режима резания, геометрии инструмента и контактных нагрузок в формулу входит деформационная характеристика процесса резания — коэффициент укорочения стружки. Предложенная аналитическая зависимость позволяет выбирать оптимальный режим с помощью расчетов, без проведения дорогостоящих стойкостных экспериментов.

The investigation objective is to develop a calculation method of selecting the optimum cutting speed corresponding to the minimum tool-wear rate. The analysis of the known optimization criteria such as tribological, thermal, energy and thermodynamic ones is made. The characteristics of their optimality through the cutting velocity (friction) are identified. Particular attention is paid to the experimental thermodynamic optimization criteria reflecting the fluctuating nature of friction and wear which are developed in Don State Technical University. It is shown that the maximum values of fluctuation criteria through varying the cutting speed characterize the increased dissipation capabilities of the cutting area. The formula for calculating the optimum cutting speed under the conditions of thermal balance on the lathe knife pads is determined. The formula contains cutting mode elements, tool geometry, contact loads and the deformation characteristic of the cutting process — chip velocity factor. The proposed analytical dependence allows selecting the optimum condition using calculations without costly wear resistant experiments.

Ключевые слова: режимы резания, оптимальная скорость, критерии оптимизации, термодинамика изнашивания.

Keywords: cutting modes, optimum cutting speed, optimization criteria, thermodynamics of wear process.

Введение. Проблема оптимизации функционирования системы трения и резания имеет как общие, так и специфические особенности.

Главной задачей трибологии деталей машин и механизмов является снижение износа и повышение долговечности пар трения в условиях сухого и граничного трения. В итоге увеличивается срок службы машин и сокращаются затраты на их эксплуатацию. В этой связи решаются задачи снижения потерь на трение — уменьшения его сил и коэффициентов. В данном случае критерием оптимизации служит интенсивность изнашивания при различных скоростях и давлениях.

Развитие машиностроения и металлообработки требует постоянного повышения качества выпускаемых машин. Этому, в свою очередь, способствует использование современного оборудования, технологий, инструмента и систем управления процессами резания.

На современном автоматизированном оборудовании при использовании твердосплавных инструментов уровень скоростей резания на токарных операциях может достигать 500 м/мин. В этих условиях необходимо обеспечить надежность инструментальной наладки в целом и получить заданные выходные параметры системы резания — технологические и экономические. К технологическим относятся: показатели точности обработки и качества обработанной

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ryzhkin.anatolia@yandex.ru, u_oley@mail.ru, denisey2003@mail.ru, fominoff83@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

поверхности (шероховатость, степень и глубина наклепа, величина и знак остаточных напряжений); ресурс (стойкость) инструмента. К экономическим показателям относятся производительность и себестоимость обработки.

На операциях формообразования при лезвийной обработке допускаемая скорость является главным элементом режима резания, и оптимальной считается такая скорость V_O, которая обеспечивает минимальную интенсивность изнашивания и максимальную стойкость инструмента. В работах А. Д. Макарова, С. С. Силина, В. Ф. Безъязычного, А. Г. Суслова и др. показано, что при скорости резания V_O (сечение среза постоянно) обеспечиваются:

— минимальные или минимально стабилизированные значения тангенциальной силы резания и высоты неровностей обработанной поверхности;
— минимальные глубина наклепа и параметры контактных процессов;
— оптимальная температура резания.

Скорость резания, при которой себестоимость изготовления минимальна, есть экономическая скорость резания $V_Э$. Скорость максимальной производительности $V_П$ — это скорость, при которой обеспечивается максимальная производительность рабочего места. При вариации скорости резания *V* кривая «производительность — скорость резания» имеет максимум при оптимальной скорости.

О критериях оптимизации процесса контактного взаимодействия в условиях трения и резания. Методам выбора оптимального режима резания (критериев оптимизации) посвящено значительное количество научных работ. Большая их часть рассмотрена в [1–5]. Приведем дополнительно материалы исследований последних лет (табл. 1), условно объединив их в следующие группы: трибологические (механофизические), тепловые, энергетические и термодинамические.

Таблица 1

Критерии оптимизации процесса резания

№ п/п	Группа критериев	Содержание критерия оптимизации	Признак оптимальности при вариации скорости трения (резания)	Примечание	Источник
1	2	3	4	5	6
1.	Трибологические	1. Коэффициент трения *f*	$f \to \min$	*h* — линейный износ, τ — время	[1–3]
		2. Сила трения *F*	$F \to \min$		
		3. Износ *h*	$h \to \min$		
		4. Скорость износа $\frac{dh}{d\tau}$	$\frac{dh}{d\tau} \to \min$		
		5. Интенсивность изнашивания *J*	$J \to \min$		
2.	Тепловые (температурные)	6. Приращение температуры резания при $L_{рез.}$	$\Delta T(\Delta E) = f(V)$ $\Delta T(\Delta E) \to \min$	*T* — температура, *E* — термо-ЭДС	[4]
		7. Равенство температур (термо-ЭДС) на контактных площадках	$T_{ПП} = T_{ЗП}$ $(E_{ПП} = E_{ЗП})$	$T_{ПП}(E_{ПП})$, $T_{ЗП}(E_{ЗП})$ — температуры (ЭДС) на передней и задней поверхностях	[5]
		8. Разница твердости $HRC_1 – HRC_2$	$\theta = f(V)$ $\Delta HRC = \max$	θ — температура как функция скорости резания; HRC_1 и HRC_2 — твердости инструментального и обрабатываемого материалов	[6]
		9. Точка перелома кривой «твердость HV — температура»	$\lg HV = f(\theta_n)$ $\theta = f(V)$	θ_n — температура точки перелома	[7]

		10. Оптимальная скорость резания $V = \frac{K^2 \lambda c\rho a_1 b_1^2 E^{0,2}}{4(\sin\alpha)^{0,1}} (\frac{\theta}{P_z})^2 [1 + \frac{2,65\lambda_p \beta\varepsilon (\frac{a_1}{\beta_1})^{0,3}}{K^2 a_2 b_2 \lambda c\rho E^{0,25} (\sin\alpha)^{0,065}} \cdot$	По $P_{z\,min}$ определяется оптимальная температура θ	θ — температура резания, $P_{z\,min}$ — минимальное или минимально стабилизированное значение силы P_z	[8]
3.	Энергетические	11. Отношение общих энергозатрат процесса к единице объема удаленного материала $\eta_1 = \frac{U}{VST} = \frac{P_z V}{VST}$	$\eta_i \to \min$	S — подача, t — глубина резания	[9]
		12. Отношение тепловой активности стружки к теплоте резания $A = \frac{VStc\rho T}{P_z V} = \frac{Stc\rho T}{P_z}$	$A \to \min$	$c\rho$ — удельная объемная теплоемкость стружки, T — температура резания	[10]
		13. Приращение силы резания от времени износа инструмента $e = \frac{W_u}{W} = \frac{\Delta P_z V\tau}{P_z V\tau}$ $e_u = \frac{W_u}{V_u}$; $e = \frac{W}{V}$	$e \to \min$	$\Delta P_z = P_\tau - P_o$ — приращение силы P_τ за время τ; W_u — энергия, затрачиваемая на износ; W — энергия, затрачиваемая на процесс резания; V_u — объем изношенной части инструмента; V — объем снятой стружки	[11]
		14. По совокупности термодинамических параметров процесса резания $G = \frac{W_p}{V} \cdot \frac{T_{nn}}{T}$	Расчет G для различных обрабатываемых материалов: $G = f(V)$, при $G = const$ оценивается V_o	W_p — мощность резания; V — объем срезаемого слоя	[12]
4.	Термодинамические	15. Аналог производства избыточной тепловой энтропии $K_S = \frac{\tilde{\omega}}{E}$; $K_\varepsilon = \frac{\tilde{\varepsilon}}{E}$	$K_S \to \min$ $K_\varepsilon \to \min$	E — постоянная термо-ЭДС пары «инструмент — деталь»; $\tilde{\varepsilon}$ — переменная термо-ЭДС; $\tilde{\omega}$ — мощность переменной составляющей термо-ЭДС	[1–3, 5]
		Характеристики мощности флуктуаций			
		16. $\tilde{N} = \tilde{P}_z \tilde{V}$, $\bar{N} = P_z V$	$\tilde{N} = \tilde{P}_z \tilde{V} \to \max$	$\tilde{P}_z$ — переменная составляющая тангенциального усилия P_z; $\tilde{V}$ — виброскорость линейных перемещений резца; $\bar{S}$ — аналог производства тепловой энтропии в микрообъемах изнашиваемого материала; $\tilde{N}$ — мощность флуктуаций; K_N — коэффициент использования мощности флуктуаций	[1, 13]
		17. $K_N \frac{\tilde{N}}{N} = \frac{\tilde{P}_z \tilde{V}}{P_z V}$	$K_N = \frac{\tilde{P}_z \tilde{V}}{P_z V} \to \max$		
		18. $S = \frac{\tilde{P}_z \tilde{V}}{\tilde{\varepsilon}}$; $\bar{S} = \frac{P_z V}{E}$	$\tilde{S} = \frac{\tilde{P}_z \tilde{V}}{\tilde{\varepsilon}} \to \max$		
		19. $K_S = \frac{\tilde{S}}{S} = \frac{(\frac{\tilde{P}_z \tilde{V}}{\tilde{\varepsilon}})}{\frac{P_z V}{E}}$	$K_S = \frac{\tilde{S}}{S} \to \max$		

В таблицу не включены технологические критерии оптимизации, т. к. они достаточно широко представлены в исследованиях С. С. Силина, В. Ф. Безъязычного, А. Д. Макарова, А. Г. Суслова и были проанализированы ранее [2, 5, 14].

Как следует из представленных в табл. 1 данных, известные критерии оптимизации на оптимальной скорости соответствуют минимальной интенсивности изнашивания, имеют экстремальные значения:

— критерии 1–5, 6, 11–13, 15 (см. графу 3 табл. 1) — минимальные;

— критерии 8, 16–19 — максимальные;

— остальные (9, 10 и 14) связаны с изменением характеристик материала от температуры и нахождением оптимальной скорости по зависимости «температура — скорость резания».

Разработанные в ДГТУ термодинамические критерии оптимизации 16–19 (см. табл. 1) отражают флуктуационную природу трения и износа, условия диссипации энергии трения и доминирующую роль тепловых процессов в изнашиваемом инструментальном режущем материале. Флуктуации тангенциальной силы резания $\tilde{P}_z$, скорости $\tilde{V}$ и переменной составляющей термо-ЭДС $\tilde{\varepsilon}$ отображают флуктуации тепловой мощности и температуры и являются источниками негэнтропии относительно зоны контакта, где имеет место накопление энтропии и износ материала. При этих условиях комплексы $\tilde{N}, K_N, \tilde{S}$ и K_S максимальны. В этом случае система резания (трения) характеризуется повышением диссипативных возможностей контакта, из-за чего уменьшается накопление энтропии в объеме и снижается износ.

Заметим, что рассмотренные критерии оптимизации основаны на использовании экспериментальных данных по интенсивности изнашивания и их соответствии «конструированным» комплексам механофизической, энергетической и термодинамической природы. Для оптимального управления процессом износа необходимо иметь аналитические зависимости для оценки оптимальной скорости (или другого управляющего параметра). Известны зависимости С. С. Силина [8] (см. строку 10 табл. 1) и А. А. Рыжкина по расчету оптимальной подачи [5], полученные из уравнения теплового баланса зоны резания. В настоящее время требует уточнения подход к расчету оптимальной скорости с позиции термодинамики необратимых процессов.

Расчетный термодинамический метод выбора оптимального режима резания при точении. Ранее сформулированы [5] термодинамические условия, при которых система резания, функционирующая в условиях интенсивного тепловыделения, «выходит» на оптимальный режим. В качестве критериев оптимизации были приняты следующие термодинамические характеристики:

— равенство температур на передней и задней поверхностях инструмента — $T_{ПП} = T_{ЗП}$;

— равенство суммарных ($Q_{ПП} = Q_{ЗП}$) и удельных ($q_{ПП} = q_{ЗП}$) тепловых потоков через контактные площадки инструмента;

— равенство тепловых энтропий на передней и задней поверхности инструмента $S_{ПП} = S_{ЗП} \left(\frac{Q_{ПП}}{T_{ПП}} = \frac{Q_{ЗП}}{T_{ЗП}};\ \frac{q_{ПП}}{T_{ПП}} = \frac{q_{ЗП}}{T_{ЗП}}\right)$.

В формулах, полученных на основе уравнения теплового баланса [5], учитывались все возможные схемы движения тепловых потоков через зону резания. Такое усложнение оказалось излишним. Наш многолетний опыт расчета оптимальной скорости резания по этим зависимостям показал, что ряд коэффициентов распределения второстепенных тепловых потоков аналитически оценить затруднительно.

Примем упрощенную схему тепловых потоков на передней и задней поверхностях резца. При этом через коэффициенты b^* и $(1 - b^*)$ учтем соответственно теплоты от трения и доли тепла деформации, уходящие в стружку и обработанную деталь (рис. 1).

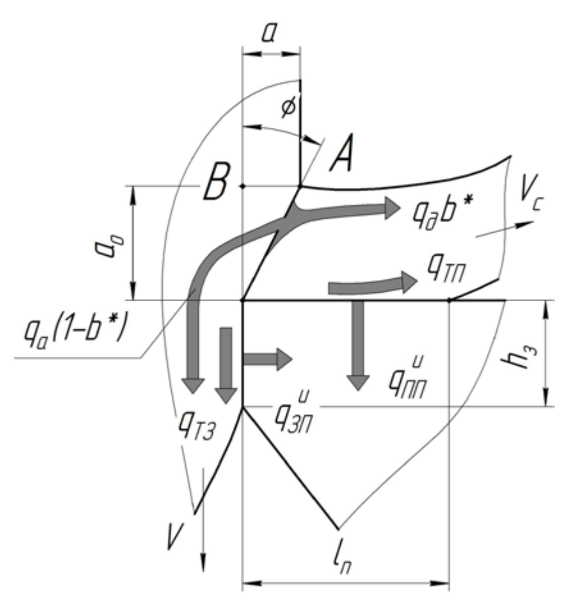


Рис. 1. Упрощенная схема действия тепловых потоков на контактных площадках резца

Рассмотрим один из вариантов решения контактной тепловой задачи, приняв в качестве условия оптимизации баланс плотностей тепловых потоков на контактных площадках инструмента:

$$q_{ПП} = q_{ЗП}\,, \tag{1}$$

$$q_{ПП} = q_д^* + q_{ТП}\,, \tag{2}$$

$$q_д^* = \tau_ф \cdot V_д \cdot b^*\,. \tag{3}$$

Здесь $q_д^*$ — теплота деформации; b^* — доля тепла деформации, ушедшего в стружку; $\tau_ф$ — напряжение сдвига в плоскости *OA* (см. рис. 1); $V_д = V\dfrac{\cos\gamma}{\cos(ø-\gamma)}$ — скорость сдвига; V — скорость резания; ø — угол сдвига; γ — передний угол.

Приняв $A = \dfrac{\cos\gamma}{\cos(ø-\gamma)}$, получим:

$$q_д^* = \tau_ф \cdot V_д \cdot b^* = A \cdot \tau_ф \cdot V \cdot b^*\,. \tag{4}$$

Плотность теплового потока от трения по передней поверхности:

$$q_{ТП} = \tau_F \cdot V_c\,, \tag{5}$$

где: τ_F — касательное напряжение на передней поверхности; $V_c = \dfrac{V}{K_a}$ — скорость движения стружки; K_a — коэффициент утолщения стружки.

В итоге:

$$q_{ТП} = \frac{\tau_F \cdot V}{K_a}\,. \tag{6}$$

Из (2), (4) и (6) получим:

$$q_{ПП} = q_д^* + q_{ТП} = V(A \cdot \tau_ф \cdot b^* + \frac{\tau_F}{K_a})\,. \tag{7}$$

Плотность теплового потока по задней поверхности резца:

$$q_{ЗП} = q_д(1-b^*) + q_{ТЗ} = A\tau_ф(1-b^*) + \tau_{ЗП}V = V(A\tau_ф(1-b^*) + \tau_{ЗП}) \tag{8}$$

Здесь $\tau_{ЗП}$ — касательное напряжение на задней поверхности резца; $(1 - b^*)$ — доля тепла деформации, ушедшего в деталь.

Приравняем правые части выражений (7) и (8):

$$V(A\tau_ф(1-b^*) + \tau_{ЗП}) = V(A\tau_ф b^* + \frac{\tau_F}{K_a})\,. \tag{9}$$

Коэффициент b^* определяется по известной зависимости [5]:

$$b^* = \frac{\sqrt{V}\sqrt{S \cdot \sin\varphi}}{1{,}33K_a\sqrt{6a_2 \sin ø} + \sqrt{V}\sqrt{S \cdot \sin\varphi}}, \qquad (10)$$

где S — подача, φ — главный угол в плане резца, a_2 — коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала.

Обозначая $B = \sqrt{\sin\varphi}$, $C = 1{,}33\sqrt{6a_2 \sin ø}$ и подставляя (10) в (9), получим:

$$\frac{A\tau_ф - \frac{\tau_F}{K_a} + \tau_{ЗП}}{2A\tau_ф} = \frac{B\sqrt{S}\sqrt{V}}{B\sqrt{S}\sqrt{V} + CK_a}. \qquad (11)$$

Решение (11) относительно $\sqrt{S}$ дает:

$$\sqrt{S} = \frac{C(K_a{}^2(A\tau_ф + \tau_{ЗП}) - \tau_F K_a)}{B\sqrt{V}(K_a(A\tau_ф - E\tau_{ЗТ}) + \tau_ф)}. \qquad (12)$$

Если (11) решить относительно $\sqrt{V}$, получим:

$$\sqrt{V} = \frac{C(K_a{}^2(A\tau_ф + \tau_{ЗП}) - \tau_F K_a)}{B\sqrt{S}(K_a(A\tau_ф - E\tau_{ЗТ}) + \tau_ф)}. \qquad (13)$$

О связи оптимальных режимов резания с деформационными процессами при резании. В формулы для расчета оптимальных скоростей резания (13) кроме напряжений $\tau_ф$, τ_F, $\tau_з$, угла сдвига, теплофизических свойств материала заготовки входит и коэффициент укорочения (усадки) стружки K_a. Очевидно, для расчета скоростей параметр K_a должен иметь экстремальные значения, и для этого необходимо учитывать функциональные зависимости K_a от параметров процесса резания.

Согласно результатам работы [15], зависимость K_a от скорости резания может быть аппроксимирована кривой вида:

$$K_a = aV^b e^{cV}, \qquad (14)$$

где: V — скорость резания; a, b и c — постоянные коэффициенты.

Имея массивы данных величин K_a при изменении скорости резания V, пользуясь известной методикой [15–17], находили постоянные a, b и c в зависимости (14).

Так, при точении стали 45 резцами Т15К6 ($t = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, $S = 0{,}23 \cdot 10^{-3}$ м/об.) для скоростей резания 0,97; 2; 3 и 4,5 м/с получили значения коэффициентов K_a, равные 3,4; 2,9; 2,55 и 2,4 соответственно. Для этого случая уравнение (14) будет иметь вид: $K_a = 1{,}26V^{0,48}e^{-0,54V}$.

В табл. 2 представлены некоторые результаты обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты оценок параметров кривых $K_a = aV^b e^{cV}$ для различных условий точения

№ п/п	Пара «инструмент — деталь»	Подача $S \cdot 10^{-3}$ м/об.	Уравнение для оценки K_a	Точка перегиба на кривой K_a	
				$K_{ап}$	$V_п$
1	2	3	4	5	6
1	Т15К6 — сталь 45 ($t = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; $V = 1{,}0 - 4{,}5$ м/с; φ = 35º; γ = –5º)	S = 0,14	$K_a = 5{,}73V^{1,49}e^{-0,69V}$	2,94	3,9
		S = 0,23	$K_a = 1{,}26V^{0,42}e^{-0,54V}$	2,97	2,17
		S = 0,43	$K_a = 3{,}2V^{1,62}e^{-1,92V}$	2,8	1,5
2	ВК8-12Х18Н10Т ($t = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; $V = 0{,}34 - 2{,}14$ м/с; φ = 45º; γ = –5º)	S = 0,23	$K_a = 3{,}37V^{0,88}e^{-0,41V}$	1,89	1,09

Изменения коэффициентов усадки стружки от скорости резания для точения стали 12Х18Н10Т сплавом Т15К6 и ВК8 представлены на рис. 2 и 3, для пары «Т15К6 — сталь 45» — на рис. 4.

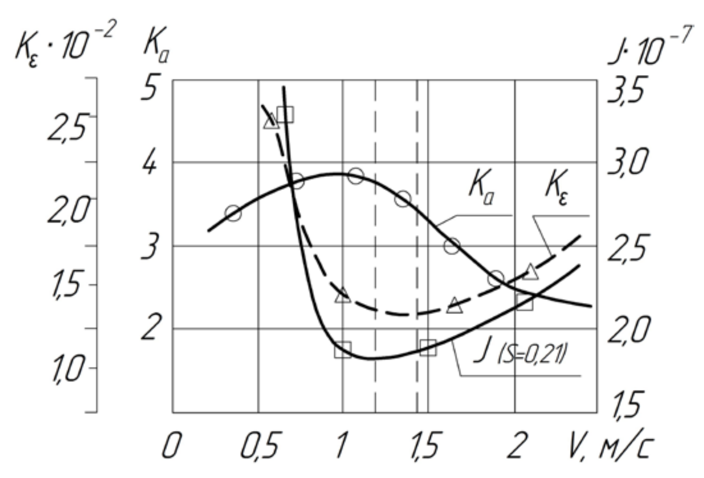


Рис. 2. Влияние скорости резания на усадку стружки при продольном точении стали 12Х18Н10Т резцом из Т15К6 ($t = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $S = 0,23 \cdot 10^{-3}$ м/об.; φ = 45º; γ = –5º)

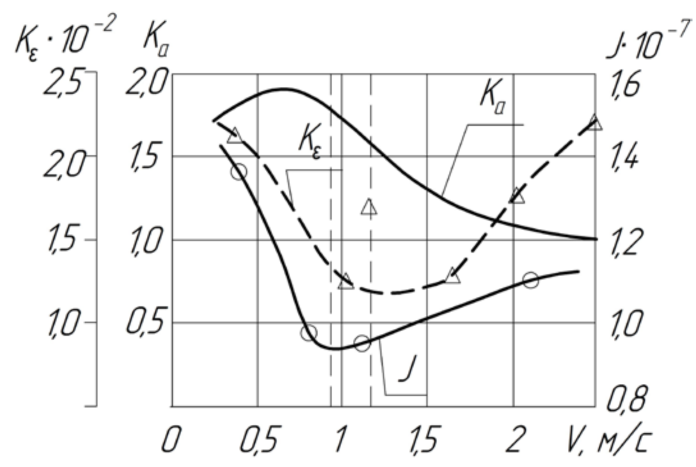


Рис. 3. Влияние скорости резания на усадку стружки при продольном точении стали 12Х18Н10Т резцом из ВК8 ($t = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $S = 0,14 \cdot 10^{-3}$ м/об.; φ = 45º; γ = –5º)

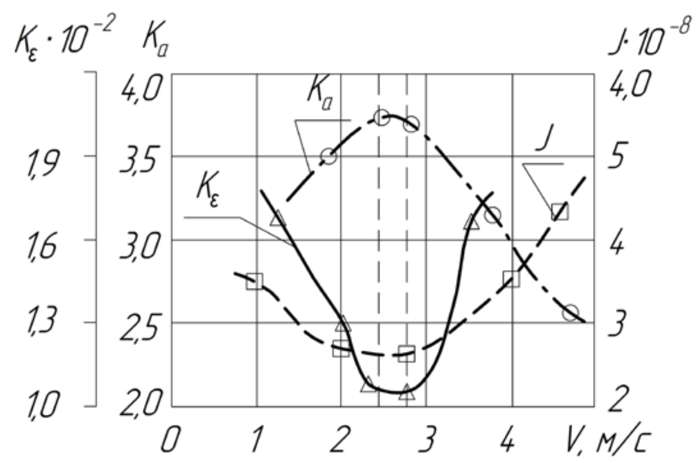


Рис. 4. Влияние скорости резания на усадку стружки при продольном точении стали 45 резцом из Т15К6 ($t = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $S = 0,11 \cdot 10^{-3}$ м/об.; φ = 35º; γ = –5º)

На рис. 2–4 кроме кривых $K_a = f(V)$ представлены результаты исследований авторов данной статьи по интенсивности изнашивания резцов (кривые $J = f(V)$ и изменение термодинамического критерия оптимизации $K_\xi = f(V)$).

Полученные данные показывают следующее. Скорость резания, соответствующая точке перегиба кривой $K_a = f(V)$ (правая вертикальная пунктирная линия на рис. 2–4), является оптимальной, так как ей соответствует минимум на кривой $J = f(V)$ (левая вертикальная пунктирная линия на рис. 2–4).

Полученные зависимости для расчета усадки стружки вида $K_a = aV^b e^{cV}$ (14) могут быть использованы для расчета оптимальных скоростей резания.

Какие значения K_a следует вводить в зависимость (13)? Очевидно, речь должна идти об экстремальных значениях этого параметра, оцениваемого обычно значениями первой и второй производной функции, в данном случае (14).

Найдем K'_a и K''_a:

$$K'_a = a[V^b ce^{cV} + bV^{b-1}e^{cV}] = ae^{cV}(bV^{b-1} + cV^b),$$
$$K''_a = ae^{cV}\{C[V^b c + bV^{b-1}] + b[V^{b-1}c + (b-1)V^{b-2}]\}. \quad (15)$$

Положим $K''_a = 0$. В (15) сомножитель $ae^{cV} \neq 0$, тогда:

$$\{c[V^b c + bV^{b-1}] + b[V^{b-1}c + (b-1)V^{b-2}]\} = 0. \quad (16)$$

После преобразований (16) получим:

$V^2 + \frac{2b}{c}V + \frac{b}{c^2}(b-1) = 0$, откуда

$$V = \frac{-bc \pm \sqrt{b^2c^2 - c^2b(b-1)}}{c^2}$$

или

$$V = \frac{-b \pm \sqrt{b}}{c} = V_n. \quad (17)$$

Таким образом, при этом значении скорости вторая производная обращается в ноль, а наибольшее значение скорости $V = V_n$ соответствует точке перегиба кривой $K_a = f(V)$ [16].

Для расчетов оптимальной скорости резания (или подачи) по (13) и (12) в функцию K_a следует ввести скорость V_n. В общем виде, приняв абсолютные максимальные значения дроби $\left|\frac{b+\sqrt{b}}{c}\right|$, получим:

$$K_a = aV^b e^{cV} = a\left(\frac{-b \pm \sqrt{b}}{c}\right)^b e^{\frac{c(-b \pm \sqrt{b})}{c}} = a[(-b \pm \sqrt{b})c^{-1}]^b e^{-b \pm \sqrt{b}}$$

или $K_a = a[(b^b + b^{\frac{b}{2}})c^{-b}e^{-\frac{b}{2}}]$, откуда:

$$K_a = ab^{\frac{b}{2}}(b^{\frac{b}{2}} + 1)c^{-b}e^{-\frac{3}{2}b}. \quad (18)$$

Для простоты расчета целесообразно использовать экспериментальные соотношения типа приведенных в табл. 2, куда следует ввести расчетные значения V_n и K_{an} (см. графы 5 и 6 табл. 2), используя в дальнейшем этот параметр в формулах (13) или (12).

Пример: рассчитать оптимальную скорость резания при обработке стали 45 резцом Т15К6: $\gamma = -5°$; $ø = 23{,}7°$; $\varphi = 35°$; $S = 0{,}14 \cdot 10^{-3}$ м/об.; $V_э = 3{,}14$ м/с; $V_n = 3{,}92$ м/с; $K_{an} = 2{,}94$; $A = \frac{\cos\gamma}{\cos(ø - \gamma)} = 1{,}13$; $B = \sqrt{\sin\varphi} = 0{,}76$; $C = 1{,}33\sqrt{6a_2 \sin\varphi} = 0{,}58 \cdot 10^{-2}$; $\tau_ф = 867 \cdot 10^6$ Па, $\tau_F = 443 \cdot 10^6$ Па, $\tau_з = 867 \cdot 10^6$ Па — касательные напряжения в плоском сдвиге на передней и на задней поверхностях резца.

$$\sqrt{V} = \frac{0{,}59 \cdot 10^{-2}(2{,}94^2 \cdot (1{,}23 \cdot 867 + 150) - 443 \cdot 2{,}94) \cdot 10^6}{0{,}75 \cdot \sqrt{0{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot (2{,}94 \cdot (1{,}13 \cdot 867 - 150) + 4{,}43 \cdot 2{,}94) \cdot 10^6}} = \frac{5029}{2951} = 1{,}7,$$

откуда $V = 2{,}9$ м/с.

Экспериментально найденная скорость $V_э = 3{,}14$ м/с, а ошибка по отношению к $V_o = 2{,}9$ м/с составляет 7,62 %.

Удовлетворительные результаты получены и для расчетных подач. Подсчитав в (22) исходные данные примера для оценки V, имея ввиду, что $V_n = 3{,}92$ м/с, $K_{an} = 2{,}94$, нашли $S_o = 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ м/об.($S_{эксп.} = 0{,}14 \cdot 10^{-3}$).

Выводы.

1. Из условия термодинамического равновесия зоны резания при лезвийной обработке, соответствующего равенству плотностей тепловых потоков на контактных площадках, получены расчетные формулы для определения оптимальной скорости резания (подачи).

2. В качестве критерия оптимальности в формулу входит усадка стружки. Методом графоаналитической обработки экспериментальных данных получены аппроксимирующие кривые $K_a = f(V)$ в виде $K_a = aV^b e^{cV}$, вторые производные которых, приравненные к нулю, есть скорости, соответствующие точке перегиба на кривых $K_a = f(V)$ — т. е. оптимальные скорости резания.

3. Предложенные аналитические зависимости позволяют выбрать оптимальный режим резания с помощью расчетов, не проводя дорогостоящих стойкостных экспериментов.

4. В качестве контроля можно воспользоваться данными по изменению критерия K_ε, что не требует больших материальных затрат. Минимум K_ε при вариации скорости соответствует точке перегиба кривой $K_a = f(V)$ и минимуму износа.

Библиографический список

1. Рыжкин, А. А. Термодинамические критерии оптимизации процесса изнашивания / А. А. Рыжкин // Надежность и эффективность станочных и инструментальных систем : сб. науч. тр. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1993. — С. 3–16.

2. Рыжкин, А. А. Физические основы обработки материалов резанием / А. А. Рыжкин, К. Г. Шучев, М. М. Климов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1996. — 342 с.

3. Ryshkin, A. A. Optimization of Metal Cutting Conditions / A. A. Ryshkin, L. S. Vorovich, B. I. Gordienko. — Radom : The Institute for Terotechnology, 2000. — 315 p.

4. Способ определения оптимальной скорости резания : а. с. 657918 СССР / А. Д. Макаров [и др.]. — № 233161/08 ; заявл. 03.03.76 ; опубл. 28.04.79, Бюл. № 15. — 5 с.

5. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: физические основы / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1995. — 291 с.

6. Выбор режимов резания труднообрабатываемых жаропрочных интерметаллидных сплавов тепловизионным методом / И. В. Анухин [и др.] // Станки, инструмент. — 2015. — № 1. — С. 16–20.

7. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавного инструмента : патент 2173611 Рос. Федерация : С2 B23 B1/00 / Е. В. Артамонов [и др.]. — № 99121439/02 ; заявл. 12.10.99 ; опубл. 20.09.01, Бюл. № 17. — 5 с.

8. Силин, С. С. Метод подобия при резании металлов / С. С. Силин. — Москва : Машиностроение, 1979. — 152 с.

9. Старков, В. К. Дислокационные представления о резании металлов / В. К. Старков. — Москва : Машиностроение, 1979. — 160 с.

10. Силин, С. С. Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критериям / С. С. Силин, А. В. Баранов // Станки, инструмент. — 1999. — № 1. — С. 16–17.

11. Тавстюк, А. А. Применение удельных энергетических параметров при оптимизации и управлении процессом резания / А. А. Тавстюк, А. Г. Лютов, Г. Н. Коуров // Станки, инструмент. — 2014. — № 2. — С. 29–34.

12. Закураев, В. В. Оценка условий оптимального режима резания по энергетическим характеристикам процесса / В. В. Закураев, С. И. Хадеев. — Новокузнецк : Межотраслевой НТК, 2007. — 187 с.

13. Рыжкин, А. А. Способ определения оптимальной скорости резания : патент 2521943 Рос. Федерация : B23B1/00/ А. А. Рыжкин [и др.]. — № 2012105415/02 ; заявл. 15.02.12; опубл. 10.07.14, Бюл. № 19. — 7 с.

14. Рыжкин, А. А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2005. — 312 с.

15. Виноградов, А. А. Определение оптимальной скорости резания по коэффициенту усадки стружки / А. А. Виноградов // Станки, инструмент. — 1991. — № 7. — С. 32–33.

16. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн. — Москва : Физматгиз, 1962. — 608 с.

17. Грановский, Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г. И. Грановский. — Москва : Машиностроение, 1982. — 112 с.

References

1. Ryzhkin, A.A. Termodinamicheskie kriterii optimizatsii protsessa iznashivaniya. [Thermodynamic optimization criteria of wear process.] Nadezhnost' i effektivnost' stanochnykh i instrumental'nykh sistem: sb. nauch. tr. [Reliability and

efficiency of machine tool and development systems: Coll.of sci.papers.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1993, pp. 3–16 (in Russian).

2. Ryzhkin, A.A., Shuchev, K.G., Klimov, M.M. Fizicheskie osnovy obrabotki materialov rezaniem. [Basic physics of materials machining.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1996, 342 p. (in Russian).

3. Ryshkin, A.A., Vorovich, L.S., Gordienko, B.I. Optimization of Metal Cutting Conditions. Radom: The Institute for Terotechnology, 2000, 315 p.

4. Makarov, A.D., et al. Sposob opredeleniya optimal'noy skorosti rezaniya: a. s. 657918 SSSR . [Method of optimum cutting speed determination.] Invention certificate USSR, no. 657918, 1979 (in Russian).

5. Ryzhkin, A.A. Obrabotka materialov rezaniem: fizicheskie osnovy. [Materials machining: basic physics.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1995, 291 p. (in Russian).

6. Anukhin, et al. Vybor rezhimov rezaniya trudnoobrabatyvaemykh zharoprochnykh intermetallidnykh splavov teplovizionnym metodom. [Selection of the cutting conditions for hard-to-machine heat-proof intermetallic alloys by thermal-imaging method.] Stanki i instrument, 2015, no. 1, pp. 16–20 (in Russian).

7. Artamonov, E.V., et al. Sposob opredeleniya optimal'noy skorosti rezaniya tverdosplavnogo instrumenta: patent 2173611 Ros. Federatsiya: S2 B23 B1/00. [Method for determining optimum cutting speed of the carbide-tipped tool.] Patent RF, no. 2173611, 2001 (in Russian).

8. Silin, S.S. Metod podobiya pri rezanii metallov. [Similarity method under metal cutting.] Moscow: Mashinostroenie, 1979, 152 p. (in Russian).

9. Starkov, V.K. Dislokatsionnye predstavleniya o rezanii metallov. [Dislocation concept of metal cutting.] Moscow: Mashinostroenie, 1979, 160 p. (in Russian).

10. Silin, S.S., Baranov, A.V. Optimizatsiya operatsiy mekhanicheskoy obrabotki po energeticheskim kriteriyam. [Optimization of machining operations on the energy criteria.] Stanki i instrument, 1999, no. 1, pp. 16–17 (in Russian).

11. Tavstyuk, A.A., Lyutov, A.G., Kourov, G.N. Primenenie udel'nykh energeticheskikh parametrov pri optimizatsii i upravlenii protsessom rezaniya. [Application of specific energy parameters during the optimization and control of the cutting process.] Stanki i instrument, 2014, no. 2, pp. 29–34 (in Russian).

12. Zakuraev, V.V., Khadeev, S.I. Otsenka usloviy optimal'nogo rezhima rezaniya po energeticheskim kharakteristikam protsessa. [Assessment of the conditions for optimum cutting mode on the energy performance of the process.] Novokuznetsk: Mezhotraslevoy NTK, 2007, 187 p. (in Russian).

13. Ryzhkin, A.A., et al. Sposob opredeleniya optimal'noy skorosti rezaniya: patent 2521943 Ros. Federatsiya: B23B1/00. [Method for determining the optimum cutting speed.] Patent RF, no. 2521943, 2014 (in Russian).

14. Ryzhkin, A.A. Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumental'nykh rezhushchikh materialov. [Thermophysical processes under the tool cutting materials wear]. Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2005, 312 p. (in Russian).

15. Vinogradov, A.A. Opredelenie optimal'noy skorosti rezaniya po koeffitsientu usadki struzhki. [Determination of optimum cutting speed by the chip shrinkage factor.] Stanki i instrument, 1991, no. 7, pp. 32–33 (in Russian).

16. Bronstein, I.N. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov. [Handbook on mathematics for engineers and students of the technical colleges.] Moscow: Fizmatgiz , 1962, 608 p. (in Russian).

17. Granovskiy, G.I. Obrabotka rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy rezaniya metallov. [Elaboration of the experimental studies results of metal cutting.] Moscow: Mashinostroenie, 1982, 112 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 31.05.2016
Сдана в редакцию 31.05.2016
Запланирована в номер 30.09.2016

Received 31.05.2016
Submitted 31.05.2016
Scheduled in the issue 30.09.2016